

トンネルと地盤の相互作用の設計上の取扱いに関する一考察

小山幸則¹・清水 満²・佐藤 豊³

¹正会員 (財)鉄道総合技術研究所 トンネル研究室 室長 (〒185 東京都国分寺市光町 2-8-38)

²正会員 (財)鉄道総合技術研究所 トンネル研究室 研究員 (〒185 東京都国分寺市光町 2-8-38)

³正会員 工修 (財)鉄道総合技術研究所 前トンネル研究室 研究員 (〒185 東京都国分寺市光町 2-8-38)

設計手法の違いによるセグメント覆工と地盤の相互作用に関する室内模型実験の結果と、それに基づいて代表的な設計モデルについてその適用性を考察した結果について述べる。シールドトンネルの相互作用に関する実験と考察を行い、設計に用いられているモデルの評価を行った。その結果、いずれのモデルでも安全なトンネルを設計するという目的を達成する上では、十分なものと考えられたが、より合理的な設計を求めるには慣用モデルでは不十分であることが分かった。

Key Words : shield tunnel, design method, earth pressure, model test

1. はじめに

都市トンネルの主要な工法であるシールド工法では、一般にセグメントをリング状に組み立てて覆工体としている。このセグメントの製作費は、トンネル全工事費の20~40%を占めるといわれており、シールド工事費を高価なものとしている一因となっている。セグメント覆工の設計モデルは、日本および海外において種々のものが提案されているが、日本では慣用計算法と呼ばれるモデルが広く用いられている。この方法は土圧理論に基づき、設計実務上の簡便さを考慮してモデルの単純化が図られており、多くの設計実績からこれによればトンネルの安全性の確保が可能であることが実証されている。しかし、実トンネルにおけるセグメント覆工応力の計測値と、このモデルによる計算値には大きな差異があり、特に良質地盤においてはセグメントの設計が過大に安全側となる場合のあることが指摘されている。本論文では、セグメント覆工と地盤の相互作用に関する室内模型実験の結果と、それに基づいて代表的な設計モデルについてその適用性を考察した結果について述べる。

2. 既往の設計モデル

一般にセグメントの設計においては、セグメントリングの構造モデルと、地盤とセグメントリングの相互作用モデルを組み合わせて、セグメントに発生する断面力を計算する。ここでは地盤とセグメントリングの

相互作用モデルについて、現在、日本および諸外国の設計でよく用いられている慣用モデル¹⁾(慣用計算法におけるモデル)、周囲ばねモデル^{2),3)}、連続体支持モデル^{2),3),4)}を取り上げる。

日本で広く用いられている慣用モデルは、トンネルをリング構造物として上部からの鉛直等分布土圧と側方からの等変分布土圧および上下からの鉛直等分布水圧と側方からの等変分布水圧を荷重として作用させていた。これらの荷重によってトンネルは変形するが、それに伴って生じる地盤反力を単純化して、地盤変形に独立で等分布する鉛直地盤反力と、覆工の水平変形に比例するスプリングラインより上下45°の範囲に三角形分布する水平地盤反力を考へている(図-1)。このモデルは解析解が得られているので、設計計算が簡単にできる。

一方、ヨーロッパ諸国でよく用いられている設計モデル(周囲ばねモデル)は、トンネル周辺の地盤をトンネル半径方向に作用する線形のばねとしてモデル化し、慣用モデルと同様な土圧、水圧を荷重としてトンネル構造物に与えている(図-2)。この地盤ばねは圧縮のみ有効で、引張力は作用しないとしている。また、鉛直方向土圧を上部からのみ作用すると考えると、トンネル全体の鉛直方向変位が生じることになるため、下方からの鉛直土圧を考慮することもあり、その場合には地盤ばねは引張側にも有効であるとしている。

また実際の設計に用いられるることは少ないが、トンネル構造物および周辺の地盤の一部を連続体として解析する設計モデル(連続体支持モデル)も提案されてい

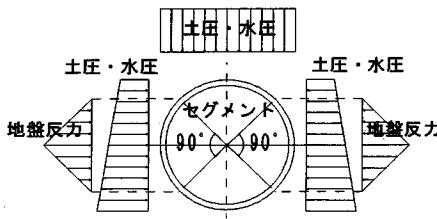


図-1 慣用モデル

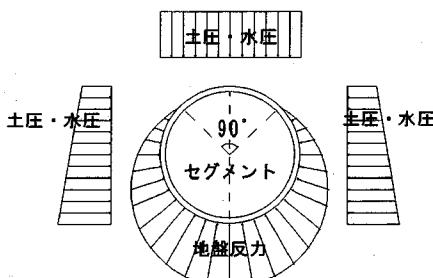


図-2 全周ばねモデル

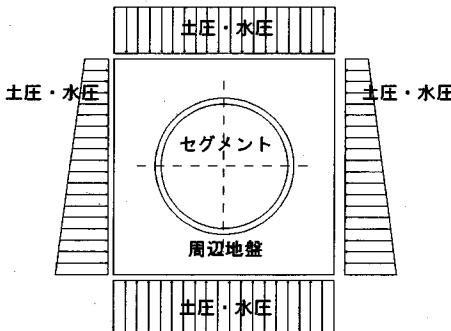


図-3 連続体支持モデル

る(図-3)。この設計モデルでは解析領域の境界に土圧を作用させている。この方法では、地盤の諸定数の設定の自由度が大きく、実際の地盤条件等に合わせた解析が可能であるが、解析領域の取り方、トンネル構造物と地盤との境界条件の設定などによって結果が大きく異なることなど、課題も多い。

3. 土槽内載荷実験

(1) 実験の目的

シールドトンネルに作用する土圧の発生現象は、トンネル掘削過程、掘削面の支持状態、裏込め注入などの影響を大きく受けたため非常に複雑である。ここではシールドトンネルに作用する土圧の発生現象を明ら

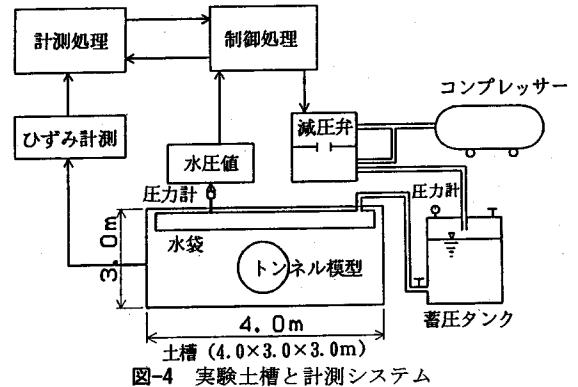


図-4 実験土槽と計測システム

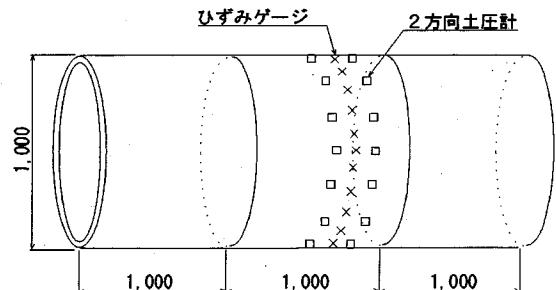


図-5 トンネル模型と計器の配置

かにして設計モデルの適用性を評価するための第一歩として、トンネル上方の土圧を増加させた場合のトンネルと地盤の相互作用に関する実験を行い、これにより生じるトンネル作用土圧と覆工応力を測定した。トンネル土圧現象を単純化したモデル実験であるため、地盤の掘削からセグメント覆工による支持までに生じる現象についての評価は別途行う必要がある。

(2) 実験方法

実験は、砂地盤中に構築されたシールドトンネルを想定し、上方からの載荷が可能な土槽中に鋼製のトンネル模型を設置し、上方地盤からの載荷に伴ってトンネルに作用する土圧およびトンネルに生じるひずみと変形、変位等を計測した。

土槽壁面の影響を受けない2次元の平面ひずみ状態が得られるように、土槽の奥行きをトンネル外径の3倍としてその中央付近で計測するとともに、土槽とトンネル模型との接触部の構造を土槽壁面がトンネル模型管を拘束しないようにした。また、上方からの載荷により土槽壁面が変形しないように土槽の剛性を十分に大きくしたほか、土槽壁面の摩擦の影響を排除するために、壁面と土の間にはポリエチレンシートとテフロンシートを二重に挟み、シート相互およびシートと壁面の間には潤滑油を塗布する処理を行った。

a) 実験土槽

実験土槽は、内空幅4.0m、高さ3.0m、奥行き3.0mの

表-1 トンネル模型の相対剛性

模型地盤	相対剛性 = $1/\kappa$ (たわみ性指数: κ)
緩地盤	$1/40$
密地盤	$1/200$

表-2 地盤材料の物性

粒 径	最大粒径 D_{max}	0.85 mm
	60%粒径 D_{60}	0.36 mm
	50%粒径 D_{50}	0.34 mm
	30%粒径 D_{30}	0.32 mm
	10%粒径 D_{10}	0.26 mm
	均等係数 U_c	1.38
	曲率係数 U_c'	1.09
土粒子の密度 ρ	2.648 g/cm^3	
締固め特性	最大乾燥密度 $\rho_{d,max}$	1.660 g/cm^3
	最適含水比 W_{opt}	15.0 %

鋼製であり、土槽の正面と裏面の壁には、トンネル模型管に合わせた計測用円形開口部を設けた。

載荷は、土槽上面で等分布となるように、土槽の天蓋に反力をとつて耐圧水袋の水圧を 2.5 kgf/cm^2 （土被り圧 $1.5D$ に相当）まで増加させた。この載荷方法における耐圧水袋の水圧の制御は、図-4に示すようなシステムで行った。

b) トンネル模型

トンネル模型は、直径10mのセグメントリングの1/10の縮小模型であり、製作上の精度を確保するために鋼板を製罐機械加工して製作した。1つの钢管は直径1.0m（外径）、長さ1.0m、管厚10mmであり($E=2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2, I=0.833 \text{ cm}^4$)、これを3つ連続させて埋設したが、計測機器は前述したように中央部の管に取り付けた。このトンネル模型の剛性は、模型地盤との相対剛性が実トンネルに近くなるように定めた。表-1に模型地盤に対応するトンネル模型の相対剛性（たわみ性指数）⁵⁾を示す。

トンネル中央の計測部には、トンネル円周に32点の2方向土圧計（半径方向、接線方向）とひずみゲージ（外面、内面）、内空変位計を設置した（図-5）。

なお、この2方向土圧計はトンネル模型管の壁面に設置し、受圧部を2本の脚で支え、この部分に生じるひずみの差からモーメントを算出し、トンネル模型管に作用する土圧の接線方向成分を求められるようにしたものである。

c) トンネル模型に作用する土圧

2方向土圧計により模型管壁面に作用する土圧の半

径方向成分（半径方向土圧）と接線方向成分（接線方向土圧）を計測した。土圧計の配置はひずみゲージを設置した中央断面の両脇にそれぞれ16分割点に設置し、併せて32分割点を計測できるようにした。

d) トンネル模型に発生するひずみと断面力

ひずみゲージはトンネル模型中央の断面に設置し、32分割点の周方向断面力を計測できるようにした。

(3) 地盤の作成

a) 地盤材料

実験地盤の材料は粘着力のないことを条件に、地盤作成や再現性確保の容易さ等の理由から硅砂5号を使用した。実験に使用した硅砂5号の物性を表-2に示す。

b) 実験地盤の種類

実験地盤の種類は緩地盤と密地盤の2種類とした。

c) 実験地盤の作成方法

緩地盤の作成は、地盤作成用シートを用いて砂を投入し1層50cmで敷き均し、所定高さで模型管を設置し、土槽上部まで投入が終わった時点で土槽内に注水して満水後排水する方法によった。

これに対し密地盤の作成は、敷き均し厚さを1層25cmとし、ランマーを用いた締め固め作業を行い、模型管のスプリングライン付近まで地盤作成を終わった時点で、これを模型管の曲率に合わせて切削し、模型管と地盤の密着性を高めて模型管を設置し、さらに、砂の投入、敷きならし、締め固めを順次行った後、土槽内の注水と排水を行う方法によった。

(4) 実験ケース

本実験に先立ち、地盤作成状況の確認および載荷装置と計測装置の操作方法の確認等のための予備実験を行った。

本実験では、緩地盤と密地盤の2種類について、それぞれ載荷を行った。

(5) 実験結果

a) 実験地盤の作成結果

実験地盤の作成結果は、乾燥密度が緩地盤では 1.40 g/cm^3 、密地盤が 1.58 g/cm^3 、締め固め度は緩地盤で83.7%、密地盤で94.9%であった。緩地盤と密地盤の差は、乾燥密度で 0.16 g/cm^3 、締め固め度で約10%であった。

b) トンネル模型に加わる半径方向土圧(p_r)

図-6に示すように、半径方向土圧はトンネル模型上部（スプリングラインよりクラウン部にかけて）緩地盤の方が大きく、逆にインバート部分では密地盤の方が大きい。緩地盤の半径方向土圧の分布形状は、トンネル模型下部（インバート部からスプリングラインにか

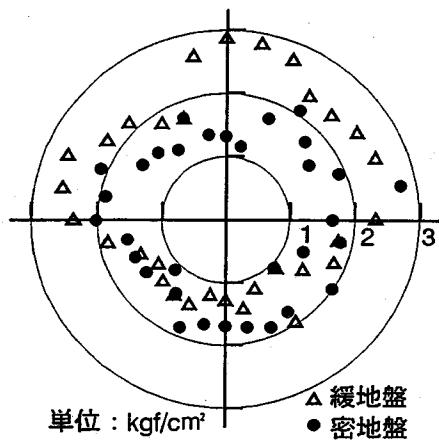


図-6 トンネル模型に作用する半径方向土圧

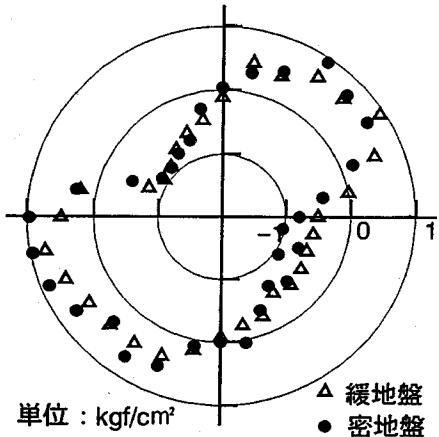


図-7 トンネル模型に作用する接線方向土圧

けて)に比べてトンネル模型上部の大きさが目立つが、密地盤では比較的均一な分布形状となっており、またスプリングライン付近の大きさが顕著である。

c) トンネル模型に加わる接線方向土圧(p_θ)

図-7に示すように、接線方向土圧の分布形状は、緩地盤ではトンネル模型上部(下向き方向)が下半部(上向き方向)に比べ大きく、密地盤では逆にトンネル下半部が上半部より大きくなっているが、半径方向土圧ほど地盤の違いによる明瞭な差は現れなかった。これは模型地盤が上部荷重により、比較的等方圧縮に近い状態となり、模型管に接する部分の地盤のせん断ひずみに大きな差がでなかつたためだと考えられる。

d) トンネル模型に発生する曲げモーメント

図-8に示すように、曲げモーメントの分布形状は緩地盤、密地盤とも、クラウン部およびインバート部付近で正曲げが発生し、スプリングライン部付近で負曲げが発生している。発生曲げモーメントの大きさは緩

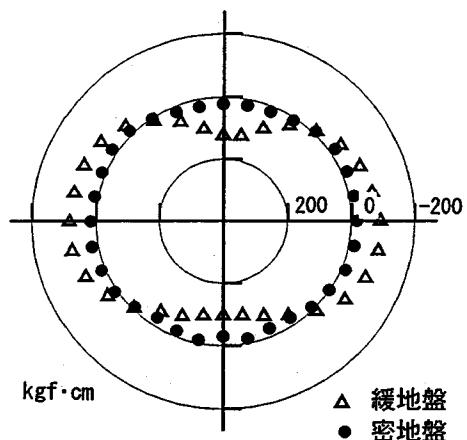


図-8 トンネル模型に発生する曲げモーメント

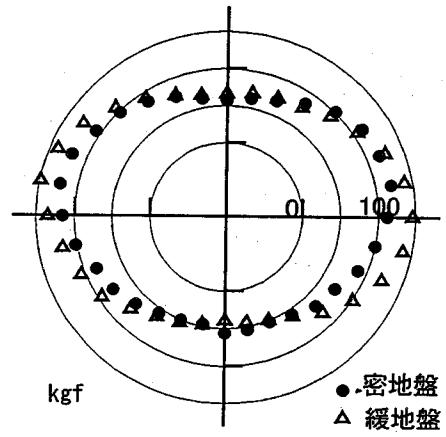


図-9 トンネル模型に発生する軸力

地盤の方が大きく、正曲げでは密地盤の5倍程度、負曲げでは4倍程度の大きさとなっている。

e) トンネル模型に発生する軸力

図-9に示すように、軸力の分布形状は緩地盤、密地盤で類似の傾向があり、クラウン部、インバート部よりスプリング部の方が2倍程度大きい値を示す。また、軸力の強度は、緩地盤も密地盤もクラウン部、インバート部では同程度の大きさであるが、スプリング部においては緩地盤の方が密地盤に比べ2割程度大きな値を示している。

(6) 実験結果の考察

実験より得られた、トンネル模型に加わる半径方向土圧と接線方向土圧より算出した鉛直土圧と水平土圧の分布を、図-10、図-11に示す。現在、シールドトンネルの設計に用いる鉛直土圧は、等分布を仮定しているが、実験より得られた鉛直土圧の形状は、緩地盤

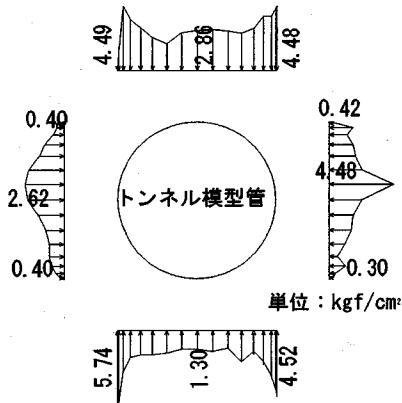


図-10 トンネル模型の土圧分布（緩地盤）

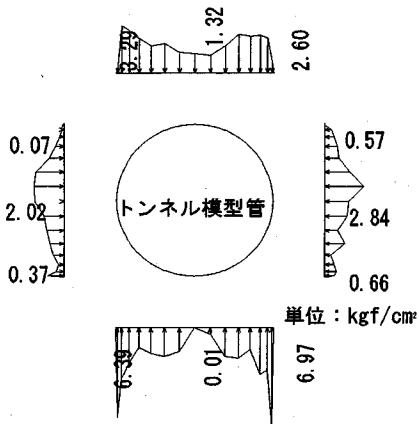


図-11 トンネル模型の土圧分布（密地盤）

密地盤のいずれの場合でも上部および下部とも中央部がくびれた形状であり、また水平土圧は、スプリングラインのやや上方を頂点とした三角形に近い形状となつた。

上方からの鉛直土圧分布が中央部のくびれた形状をしているのは、クラウン部のトンネル内への変形によりこの部分の土圧が軽減され、その減少分がクラウン部の両側に配分されたものと考えることができる。このような傾向はトンネルの相対剛性が小さい場合(密地盤の場合)ほど顕著に現れており、トンネルの相対剛性が小さく上部の荷重がトンネルに集中せず、かつ周辺地盤のせん断強度が大きい場合にこのような現象が顕著に生ずるものと考えられる。これに対して相対剛性が大きく周辺地盤の強度が小さい場合(緩地盤)には、上部からの載荷によるトンネルのたわみが密地盤に比べて大きいにもかかわらず、相対的なトンネル剛性の増大に伴って、上部荷重がトンネルに集中し、さらにせん断強度が小さい緩づめの地盤であるため、トンネル周辺の地盤が容易に塑性化して、トンネル上下部の荷重を十分に負担できないため、トンネルに作用す

るこの部分の土圧の軽減が小さく現れたと考えられる。

下方からの鉛直土圧分布の形状も上方の鉛直土圧と同様な形状であるが、上方に比べ端部の値が極端に大きい凹形となっていることが特徴的である。これは、インバート部からスプリング部にかけての接線方向土圧が大きかったためである。

水平土圧には上載荷重の増加に伴う側方土圧の增加分と、トンネル変形に伴う土圧の増加分が含まれているが、スプリングライン付近を頂点とした三角形の土圧分布形状は、トンネル模型の変形による受動的土圧が有効に作用した結果と考えることができる。

4. 実験のシミュレーション解析

設計計算手法の違いによる解析値の違いを確認することを目的として、前節で示した実験結果について、数値解析によるシミュレーションを行った。解析手法としてここで用いたのは、①慣用モデル、②全周ばねモデル、③FEM解析による連続体支持モデルの3種類である。なお、模型実験では2次元の平面ひずみ状態が保たれたものとみなし、ここではこれらの解析モデルをいずれも2次元問題として取り扱った。以下に各解析モデル、入力パラメータ、解析結果について述べることとする。

(1) 解析モデル

a) 慣用モデル

慣用モデルでは、曲げ剛性の有効率 $\eta = 100\%$ 、曲げモーメントの割増率 $\zeta = 0\%$ とし、地盤反力係数 k は次に述べる全周ばねモデルでの計算と同じく、実験値より逆算した値を用いた。また、全周ばねモデルと同様、側方土圧係数 λ を密地盤、緩地盤とも0.5として解析を行った。

b) 全周ばねモデル

全周ばねモデルによる解析ではトンネル模型の剛性を一様とし、トンネル模型全周に半径方向ばね、接線方向ばねを付けた1リングの全周ばねモデルとして解析を行った。なお、解析の着目点として、主に次の2点に解析の焦点を絞って各地盤4ケースずつの解析ケースを設定した。

- ①上部鉛直載荷により生じる下方から作用する土圧の影響を地盤ばねでどの程度表現できるか。
- ②上部からの荷重により、地盤ばねに引張力が働く場合、このばねの作用は発生断面力にどのように影響を及ぼすのか、また、このとき実験値との整合性が示せるか。

まず、それぞれの実験地盤において、①の影響を評価するために、下方から作用する土圧の有無を解析パ

ラメータにした。また、②の影響を評価するため、解析では地盤ばねに引張力が作用するとばねを切断する「ノーテンション機能」の使用の有無を解析パラメータにした。表-3に、本研究で設定した全周ばねモデルの解析ケースの一覧を示す。

c) FEM解析モデル

実験土槽とトンネル模型を剛性一様な梁要素でモデル化し、実験地盤は四角形及び三角形の平面ひずみ要素で表現した。解析には、3軸圧縮試験より得られる非線形な主応力差～ひずみ関係の曲線群を精度よく近似できる、シリカ質砂の基本的な解析で、3軸圧縮試験との整合性が確認されている⁶⁾、等の理由から、Duncan-Changモデルを用いて、非線形弾性解析を行った。実験時の載荷は鉛直方向の等分布荷重としてモデル化した。

(2) 入力パラメータ

全周ばねモデルの解析に用いた入力パラメータを表-4に示す。模型地盤のばね定数は3軸圧縮試験の値より算定した⁷⁾。また、FEM解析に用いた入力パラメータ⁶⁾を表-5に示すが、これらのパラメータは締固め度を変化させた3軸圧縮試験より得られた各パラメータの値を締固め度の関数として近似し、模型地盤の締固め度に対応する各パラメータの値をこの近似式より求めた。

(3) 解析結果

a) 緩地盤

緩地盤の曲げモーメントの実験値と解析値の比較を図-12、図-13に、軸力の比較を図-14に示す。図-12及び図-13より、全周ばねモデルで、下方より荷重を設定しなかったCase L1, L3では、インバート部のモーメントが極端に小さく、実験値をシミュレートできないことがわかる。また、ばねに引張力が作用したときに、これを切断するノーテンション解析の結果であるCase L2が全体のモーメントの分布形状やクラウン部での値が実験値に近く、最も良い一致を見せた。なお、FEM解析の結果は、作用土圧、発生断面力など、全般的に実験値に近い値を示すことができた。

b) 密地盤

密地盤の解析結果も緩地盤の結果同様、図-15～図-17に示す。密な地盤でも緩地盤と同様に、下部からの荷重を与えなかった全周ばねモデルの解析ケースCase D1, D3では上部からの荷重を全周のばねで全体的に受けてしまうため、インバートのモーメントを小さく見積もってしまい、実験値に合わない結果となつた。また、慣用モデルでは、特に密な地盤で、トンネルクラウン部のモーメントをかなり大きく算出してしまう傾

表-3 全周ばねモデルの解析ケース

解析ケース	地盤	ノーテンション機能	底部からの地盤反力
Case L1	緩地盤	使用する	作用させない
Case L2			作用させる
Case L3		使用しない	作用させない
Case L4			作用させる
Case D1	密地盤	使用する	作用させない
Case D2			作用させる
Case D3		使用しない	作用させない
Case D4			作用させる

表-4 全周ばねモデル解析の入力パラメータ

項目	種別	物性値、条件		備考
模型地盤の物性値	半径方向ばね kgf/cm/cm ²	密地盤	9.66	
	緩地盤	2.00		
	接線方向ばね kgf/cm/cm ²	密地盤	3.22	半径方向ばね の1/3
	緩地盤	0.67		
荷重条件	分布荷重 kgf/cm ²	上部鉛直	2.5	$\lambda = 0.5$
		下部鉛直		
		側部水平	1.25	

表-5 FEM解析の入力パラメータ

解析ケース	単位体積重量 tf/m ³	Duncan-Chang パラメータ				
		Rf	K	n	c	φ
緩地盤	1.503	0.93	172	0.858	0.1	29.8°
密地盤	1.773	0.99	1066	0.591	0.1	32.2°

向が認められた。なお、この密地盤では、ノーテンション機能を働かせず、クラウンとインバートに生じる引張りばねを残した解析Case D4が実験値に最も近い値を示した。このように、良く締まった砂質地盤では、作用させた上部荷重がかなり軽減されてトンネルに作用したため、この影響を考慮した解析が実験値に近い値を示したと考えられる。なお、FEM解析の結果は緩地盤の解析結果と同様、全体的に実験値の結果をうまくシミュレートしていた。

(4) 考察

本解析では、トンネル模型の周辺地盤反力発生機構や作用荷重の解明を目的として、トンネル模型の大型土槽実験のシミュレーションを行った。この解析により、実験の境界条件を解析モデルに取り込みやすいFEMによる連続体解析では、トンネル模型の沈下量やトンネル模型に発生する断面力などの値の大きさと、その分布傾向において実験結果を概ね表現できた。また、全周ばねモデルによる解析では、地盤の締固めの度合いを考慮した地盤ばねの設定が実測値に近い値を算定するために必要であることを示した。すなわち、

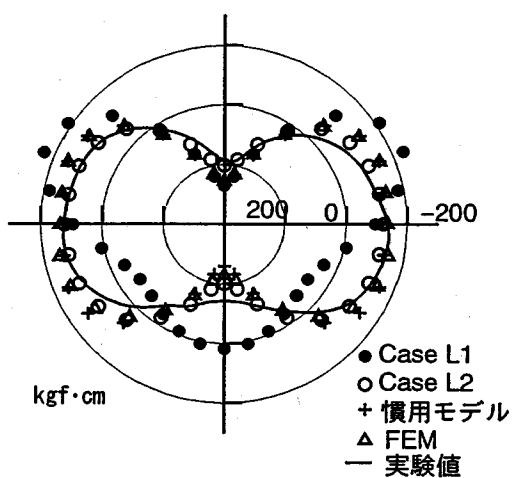


図-12 曲げモーメントの比較（緩地盤 1）

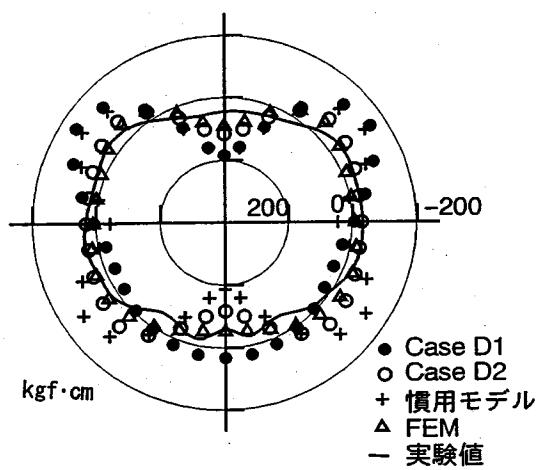


図-15 曲げモーメントの比較（密地盤 1）

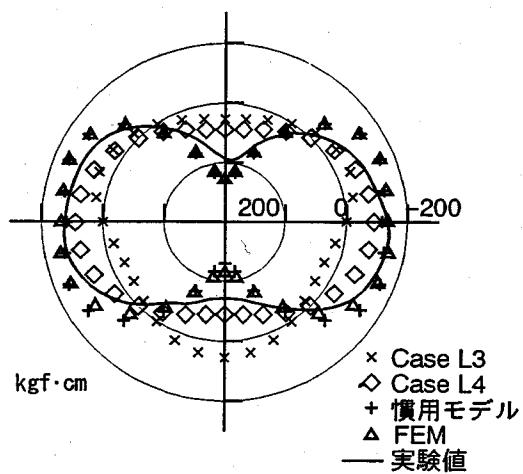


図-13 曲げモーメントの比較（緩地盤 2）

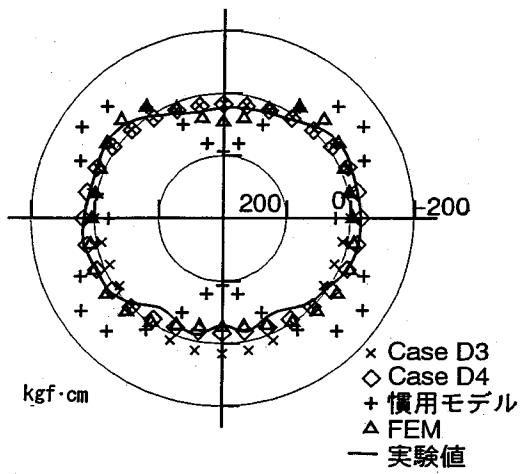


図-16 曲げモーメントの比較（密地盤 2）

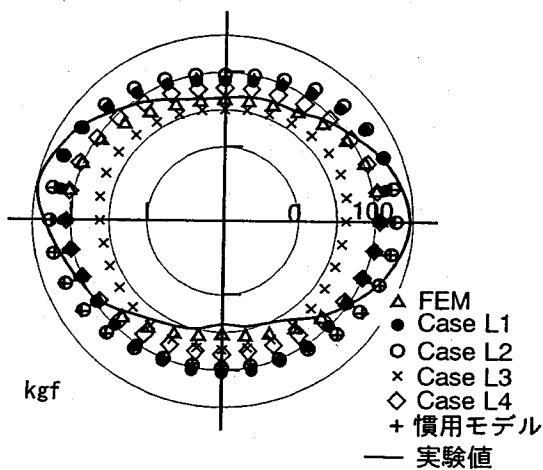


図-14 軸力の比較（緩地盤）

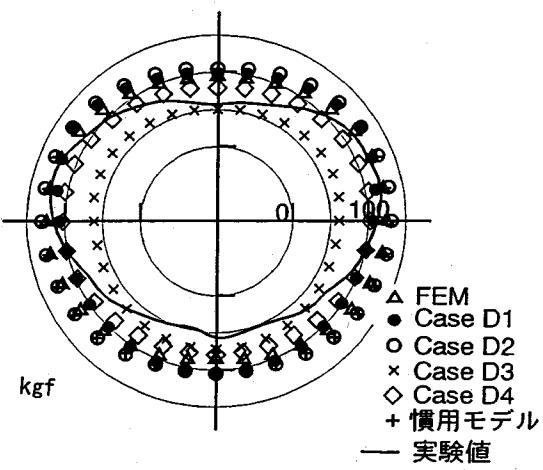


図-17 軸力の比較（密地盤）

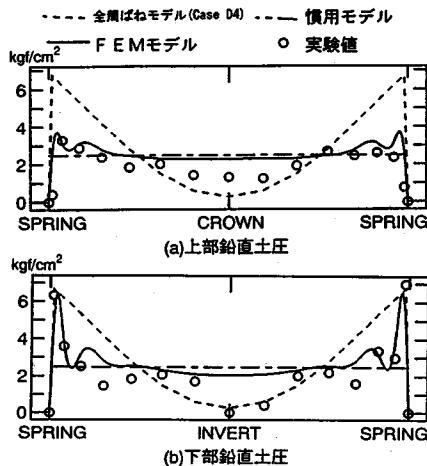


図-18 鉛直方向土圧の比較（密地盤）

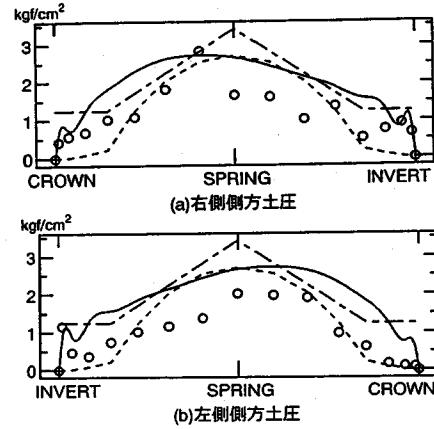


図-19 水平方向土圧の比較（密地盤）

比較的密で良く締まった砂質土の場合には、地盤とトンネルの間に発生する引張力を残したまま、全周ばねモデルによる解析を行うことにより、トンネルクラウンやインバート部での変位発生に伴う鉛直土圧の軽減効果を表現できる可能性を示した。このことをさらに確認するため、図-18、図-19に示すように、トンネル模型で計測された土圧と解析値を設計荷重の形状に換算した。これらより、実験で計測された上下方向の中中央部（クラウンやインバート）に生ずる荷重が端部よりも小さく、凹型の荷重形状となることが読みとれると同時に、慣用モデルのようにこの形状を矩形としてしまうと実際に作用した荷重よりかなり大きな荷重を設定してしまうことになる。このことは上下荷重の地盤反力として生じる側方土圧にも当然反映されて、結果的に水平方向の荷重もかなり大きく作用させてしまう結果となってしまう。以上、この実験のシミュレーション解析から得られた知見をまとめれば以下のとおりである。

①全周ばねモデルによる解析を行う際には、引張方向のばねを作用させるか否かは、地盤の特性を十分考慮した上で設定する必要がある。特に密に締め固められた地盤では、上方荷重によって生じる地盤ばねの引張力を残した解析を行うことによって、トンネルに作用する土圧の変位依存性を表現することになり、実験値に近い値を示すことができた。

②全周ばねモデルでは、上載荷重の地盤反力として生じる下部からの荷重を与えないければ、地盤のばね反力のみでは、実験値をうまく表現できないことがわかった。

5. 結 論

本研究では、土槽内に埋め込んだトンネル（鋼管）に

対して、土槽地盤表面から荷重を加えるという比較的単純な載荷実験を行った。従って実際のシールドトンネルに生じている現象を模したものではないが、トンネルと地盤の相互作用を把握する基礎となりうると考えられる。これから得られた結論を要約すると次のようになる。

①実験結果と全周ばねモデルによる解析結果から、慣用モデルのようにトンネル下部には水圧と等分布地盤反力のみが作用すると考えるより、下部にもトンネルを押し上げるような土圧（主動的に作用する土圧）も作用すると考える方が、トンネルの地盤内挙動を説明できる。

②実験結果と連続体支持モデルおよび全周ばねモデルによる解析結果から、通常、側方の圧縮側変位についてのみ考慮されている土圧の変位依存性だけでなく、上下方向からの土圧についても圧縮側および引張側とも変位依存性を考慮するのが適当である。ただし、その大きさは地盤とトンネルとの相対剛性により異なる。

さらに、これらに基づいて3つの設計モデルの適用性を評価すると次のようになる。

(1) 慣用モデル

セグメントの断面設計に最も大きな影響を及ぼす曲げモーメントについて、その発生モードは実験結果と合っているが、その大きさは過大に計算される傾向にある。安全性は確保できるが、経済性を追求する場合に不十分なモデルとなる可能性がある。

(2) 全周ばねモデル

地盤ばねの設定に対する自由度が慣用モデルに比べて大きいので、実験結果の曲げモーメントに合致する

計算値を得ることが可能である。しかし、計算に用いる各種のパラメータの設定により結果が大きく異なるので、その設定法の検討が必要である。

(3) 連続体支持モデル

実験結果をうまくシミュレートできるが、設計への適用にあたっては、全周ばねモデルと同様に計算に用いる各種パラメータの設定法の検討が必要である。特に設計においての荷重の取扱い方について十分な検討が必要である。

以上に述べたように、本論文では、模型を用いて地盤とシールドトンネルの相互作用のモデル化について、実験と考察を行い、設計に用いられているモデルの評価を行った。その結果、いずれのモデルでも安全なトンネルを設計するという目的を達成する上では、十分なものと考えられたが、より合理的な設計を求めるには慣用モデルでは不十分であることが分かった。

しかし、トンネルに生じる現象は複雑であり、今回の模型実験ではモデルの適用性の可能性の評価を行ったに過ぎず、実トンネルの挙動計測に基づく適用性の評価が必要である。

6. おわりに

本研究は、シールドトンネル覆工の合理的な設計法を確立するための第一段階として行ったものである。

今後、実トンネルの挙動計測を行い、設計モデルの評価に関する研究を継続する予定である。なお、本研究は運輸省から委託を受けた「鉄道技術基準整備のための調査研究」の一環として実施したものである。

最後に、実験に協力を頂いた(株)熊谷組技術研究所の諸氏に感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書(シールド編)・同解説, 1986. 6
- 2) Duddeck : *Empfehlung zur Berechnung von Tunnels im Lockergestein (1980)*, DIE BAUTECHNIK, 1980, pp.351-353,
- 3) Le groupe de travail no7 : *Texte provisoire des reflexions sur les methodes usuelles de calcul du revetement des souterrains*, TUNNELS, 14, 1976, pp.56-57,
- 4) Bergian Member Society of ISSMFE : *BELGIAN GEOTECHNICAL VOLUME published for the 1985 golden jubilee of the international society for soil mechanics and foundation engineering*, 1985.
- 5) 東田 淳, 三笠正人：弾性論による埋設管の土圧の検討 土木学会論文集, 第376号/III-6, 1986.
- 6) 川本眞万, 林 正夫：地盤工学における有限要素解析 pp.67-71, 培風館, 1990.
- 7) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV. 下部構造編 1990.

(1994. 3. 30受付)

CONSIDERATIONS IN TUNNEL-GROUND INTERACTION FOR SHIELD TUNNEL DESIGN

Yukinori KOYAMA, Mitsuru SHIMIZU and Yutaka SATO

Model test result for tunnel-ground interaction and consideration of designing models applicability using the result are discussed. Some design models are evaluated for the interaction by the model test result. Since any evaluated models have sufficient safety on shield tunnel design, conventional design model in Japan has a little rationality.